



心於至善

# 同步电机在大电网上运行

黄允凯

东南大学电气工程学院



- 同步发电机的并联运行

- 同步发电机最基本的运行方式
- 现代的发电厂中，无例外地采用几台同步发电机并联运行的方式
- 电力系统中又是许多发电厂在并联运行。

## 供电的主要要求

- 足够的用电量
- 高的供电质量  
电压和频率为额定值
- 经济、可靠
- 不同季节、不同时间，发电厂可按照负荷变化情况，确定投入并联运行的发电机台数



- 无穷大电网

$$U = \text{const} \quad f = \text{const}$$

- 这样的电网对单台发电机来说，可以称为无穷大电网或无穷大汇流排
- 并联运行也就是单台发电机和无穷大汇流排的并联运行。

并联条件：

频率、电压幅值、相序、相角



- 与变压器并联运行的区别

- 当变压器并联运行时，其初级电压和次级电压都必需相等，因此绕组的阻抗将决定负载电流的分配
- 连接至同一汇流排的发电机必须有相同的额定电压和相同的额定频率，同步电抗的数值并不能决定负载电流的分配

## 整步

- 把同步发电机并联至电网的手续称为**整步**亦称为**并列**或**并车**
- 在并车的时候必须避免产生巨大的冲击电流



## 整步条件

使发电机每相电势瞬时值与电网电压瞬时值保持一直相等

### 1. 相等或接近的频率

- 频率不同，矢量 $E$ 与 $U$ 将产生相对运动，即产生一直变化的环流，引起发电机内的功率震荡

### 2. 相等的电压——波形、大小和相位

- 波形不同，如发电机中有高次谐波，将产生高次谐波环流，增加运行时损耗
- 如电压大小、相位不同，也产生一环流。如在极性相反时投入，环流将达到 $20-30I_N$ ，在电磁冲力作用下，定子绕组端部将受到大的冲击

### 3. 相同的相序



## 并车的准备工作

### 1. 检查并车条件

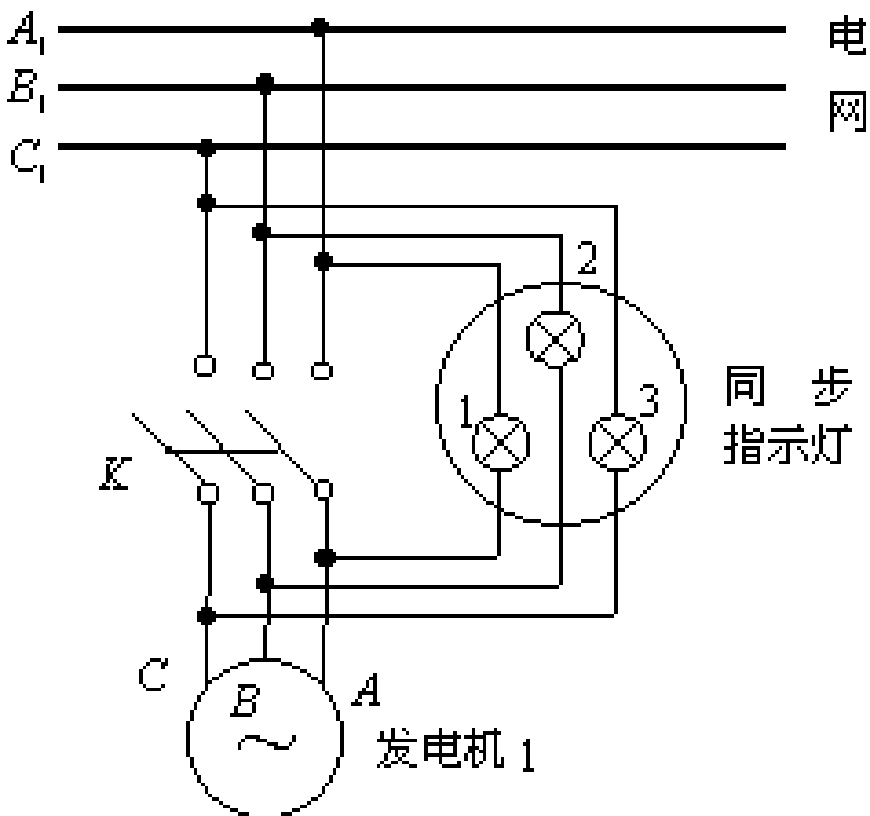
通常用电压表测量电网电压，并调节发电机的励磁电流使得发电机的输出电压  
 $U=U_1$ 。

### 2. 确定合闸时刻

借助同步指示器检查并调整频率和相位  
以确定合闸时刻。



## 同步指示灯



(a) 灯光明暗法

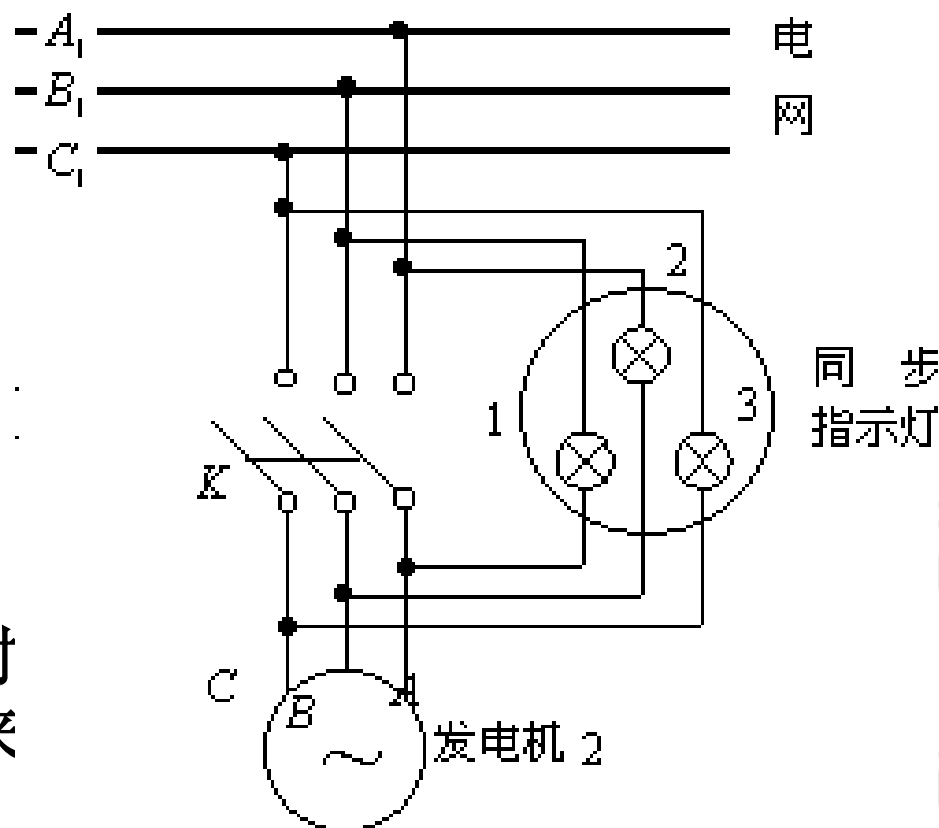
### 并车方法:

- ①通过调节发电机励磁电流的大小使电压相等；
- ②电压调整后，如果相序一致，灯光应表现为明暗交替。如果灯光不是明暗交替，则说明相序不一致，应调整发电机的出线相序或电网的引线相序，严格保证相序一致；
- ③通过调节发电机的转速改变频率，直到灯光明暗交替十分缓慢时，说明频率已十分接近，等待灯光完全变暗的瞬间（相位相同），即可合闸并车

## 同步指示灯

并车方法:

- ①通过调节发电机励磁电流的大小使电压相等；
- ②电压调整后，如果相序一致，则灯光旋转，如灯光同步则说明相序不一致；
- ③通过调节发电机的转速改变频率，直到灯光旋转十分缓慢时，说明频率十分接近，这时等待灯 3 完全熄灭的瞬间到来即可合闸并车。



(b)灯光旋转法

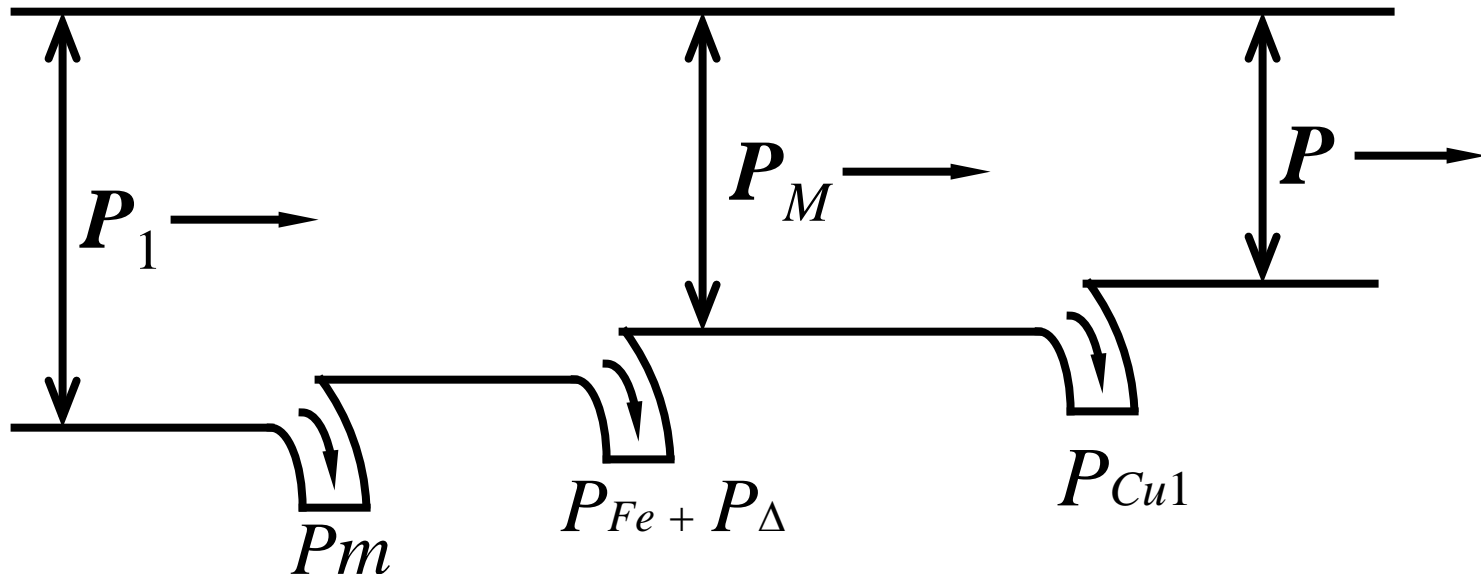


## 自整步法

- 前提：相序一致
- 将励磁绕组通过电阻短接 约为励磁电阻的10倍
- 拖动到接近同步速(相差2~5%)，在无励磁电流的情况下，将发电机接入电网
- 再接通励磁并调节励磁，依靠定子磁场和转子磁场之间的电磁转矩将转子拉入同步转速，并车过程结束。
- 需要注意的是，励磁绕组必须通过一限流电阻短接，因为直接开路，将在其中感应出危险的高压；直接短路，将在定、转子绕组间产生很大的冲击电流。
- 优点：操作简单，方便快捷；
- 缺点：合闸时有冲击电流。



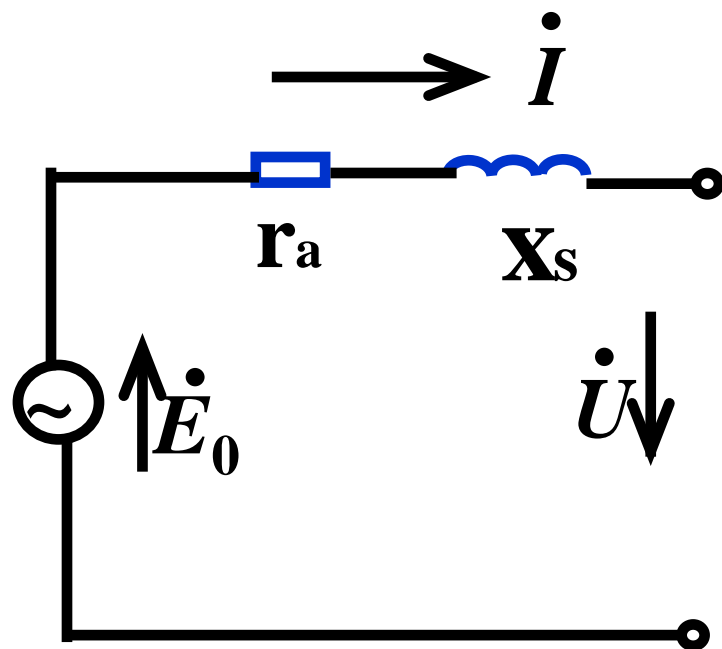
## • 同步发电机的功率流程



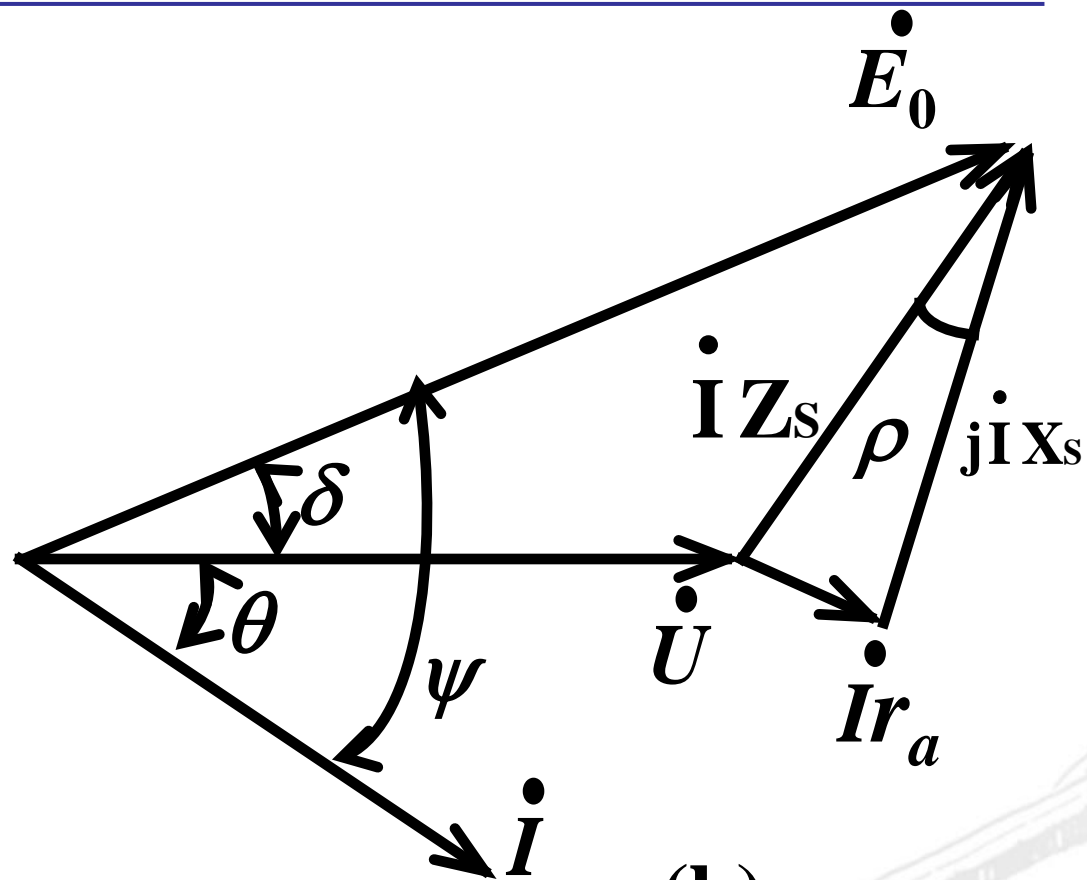
定子侧

$$P_M - P = p_{Cu1} = I^2 r_a$$

- 可以把发电机和电动机合并考虑
- 取发电机的输出电功率为正值，电动机的输入电功率便取负值。
- 发电机：  $|P| < |P_M|$
- 电动机：  $|P| > |P_M|$
- 上式同样适用于发电机和电动机



(a)



(b)

## 隐极同步发电机的等效电路和相量图

- 输出功率表示式

$$P = UI \cos \theta = \frac{E_0 U}{z_s} \sin(\delta + \rho) - \frac{U^2}{z_s} \sin \rho$$

## 电磁功率表示式

$$\begin{aligned} P_M &= UI \cos \theta + I^2 r_a = E_0 I \cos \psi \\ &= \frac{E_0 U}{z_s} \sin(\delta - \rho) + \frac{E_0^2}{z_s} \sin \rho \end{aligned}$$

$$\rho = \operatorname{tg}^{-1} \frac{r_a}{x_s}$$



- 对于发电机而言，输出功率即为端点功率 $P$
- 对于电动机而言，输出功率采用 $P_M$
- 如取发电机的 $P$ 和 $\delta$ 为正，则电动机 $P_M$ 和 $\delta$ 均应有负值
- 如把电枢电阻 $r_a$ 略去不计，则 $\rho = 0$ ， $\sin \rho = 0$ ， $Z_s = X_s$ ，端点功率和电磁功率相等

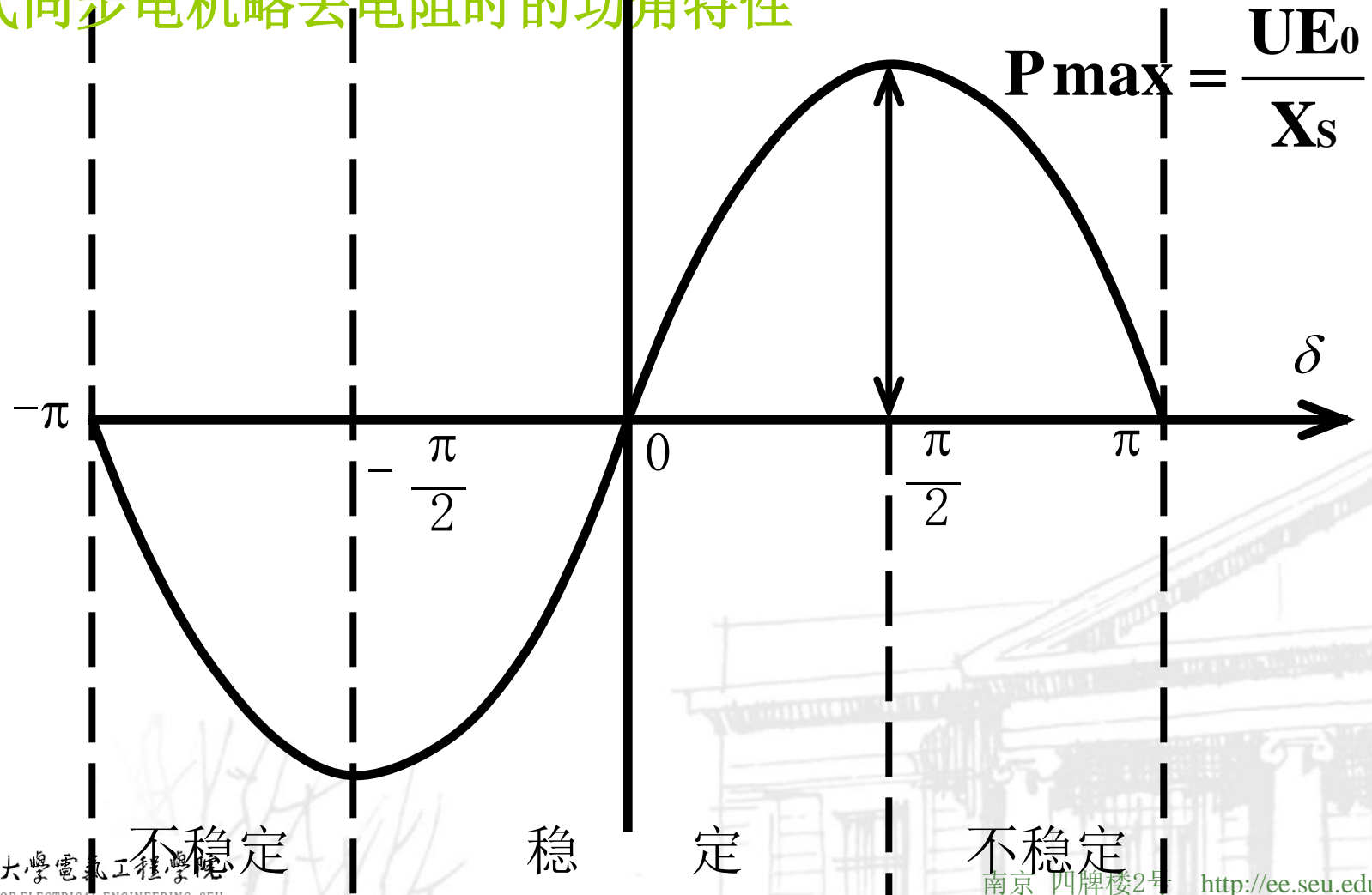
$$P = P_M = \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$



## • 功角特性

- 同步电机中所产生的电磁功率称为同步功率
- 功率 $P_M$  或 $P$  随着功角而变化的关系称为功角特性

隐极式同步电机略去电阻时的功角特性



## • 转矩特性

- 由于同步电机的转速为同步转速，且经常保持不变，故转速和功率成正比
- 略去电枢电阻，则得电磁转矩的公式为

$$T = \frac{p}{\omega} P_M = \frac{p}{\omega} \times \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta$$

## 过载能力

- 最大功率  $P_{\max}$  与  $P_N$  额定功率之比称为 **过载能力**，用  $K_M$  表示
- 隐极式同步机，在额定运行时的功角为  $\delta_N$ ，则有



$$P_N = \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta_N$$

$$P_{\max} = \frac{E_0 U}{x_s}$$

$$k_M = \frac{1}{\sin \delta_N}$$

$\delta_N$ 愈小，过载能力 $k_M$ 愈大

在一定的负载情况下

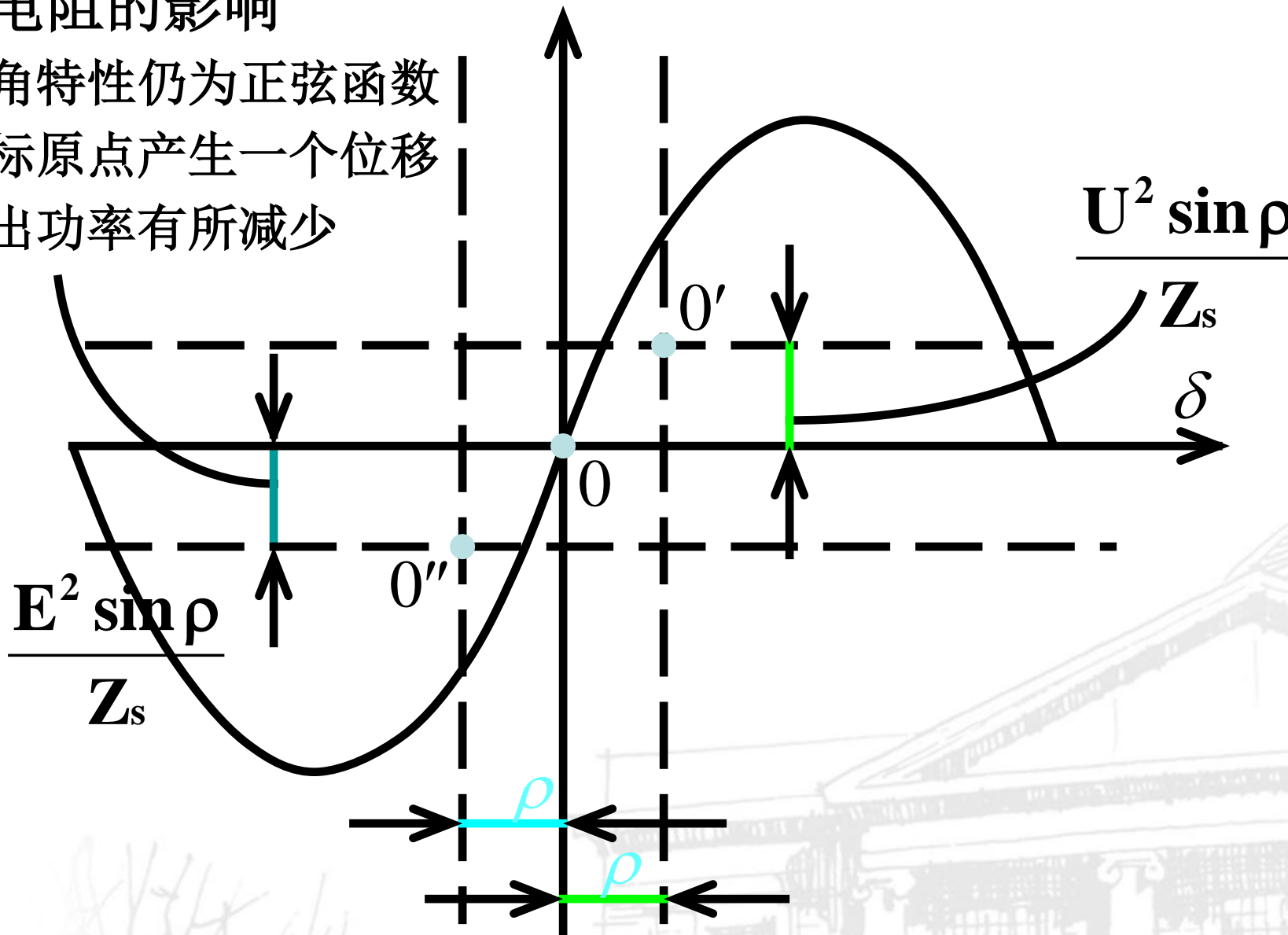
- 要减小 $\delta_N$ ，就必须减小同步电抗 $X_s$ ，即，  
**短路比大，过载能力强**
- 但增大短路比，将增加电机的成本，故过载能力不应规定得过大。汽轮发电机的过载能力一般不小于1.5





## • 电枢电阻的影响

- 功角特性仍为正弦函数
- 坐标原点产生一个位移
- 输出功率有所减少



## 电枢电阻对功角特性的影响

## - 发电机

- 输出电功率即端点功率 $P$ ，故功角特性应取 $0'$ 为原点

## - 电动机

- 由电功率转变而来的机械功率即为电磁功率 $P_M$ ，故功角特性应取 $0''$ 为原点。

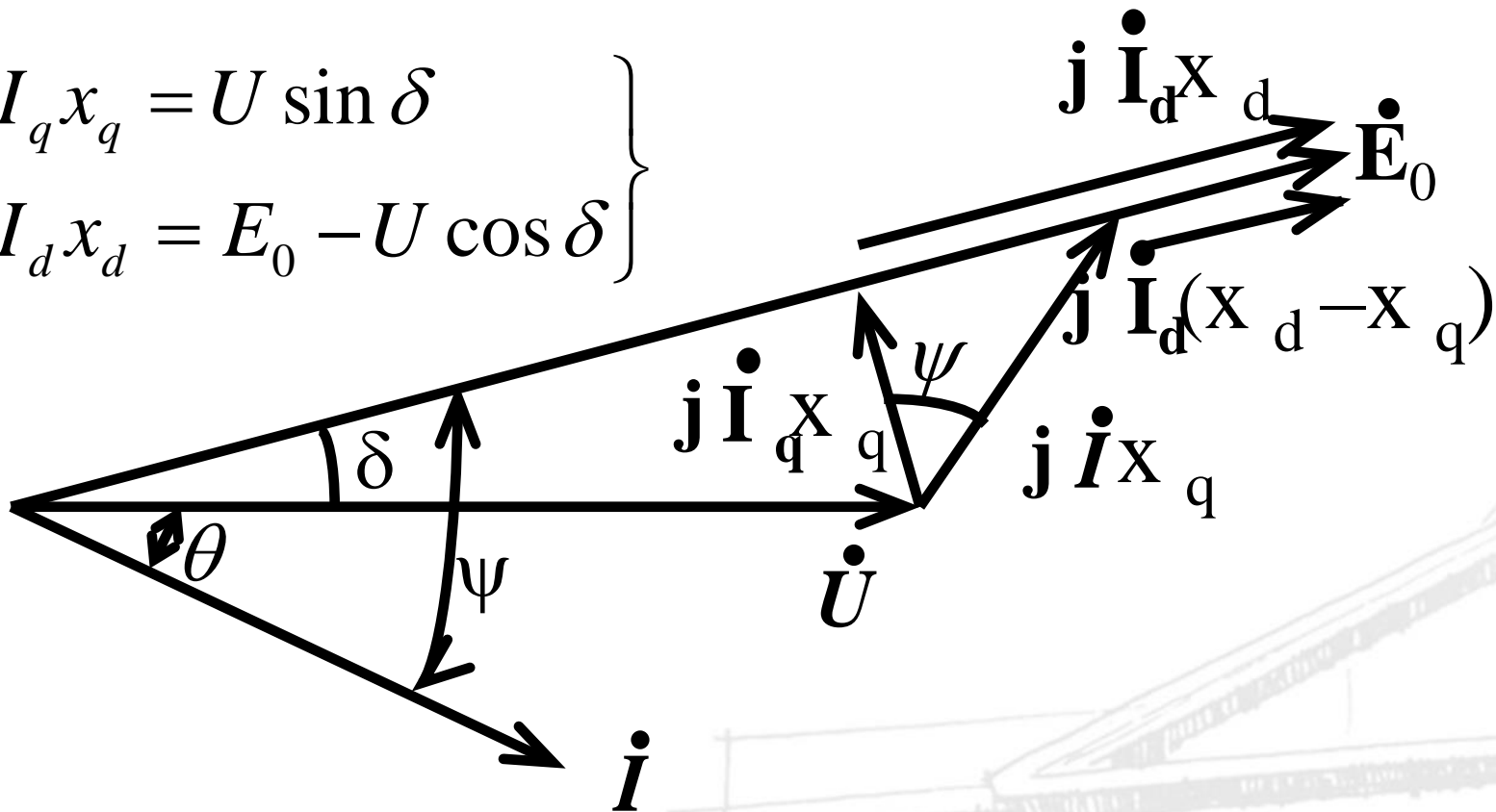
无论发电机或电动机，电枢电阻的存在，都将使最大功率的数值减小，且使最大功率在 $\delta$  角的绝对值小于 $90^\circ$  时出现



## ● 功率表示式

### — 略去电枢电阻不计

$$\left. \begin{aligned} I_q x_q &= U \sin \delta \\ I_d x_d &= E_0 - U \cos \delta \end{aligned} \right\}$$



$$P = P_M = UI \cos \theta = UI \cos(\psi - \delta)$$

$$UI_q \cos \theta + UI_d \sin \delta$$

## 功率的组成

$$P = P_M = \frac{E_0 U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2 (x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta$$

基本电磁功率

附加电磁功率

- 附加电磁功率

- 与 $E_0$ 无关，只与电网电压 $U$ 有关

- 即使 $E_0=0$ ，转子没有加励磁，只要 $U \neq 0$ ， $\delta \neq 0$ ，而沿交轴直轴的磁阻不相同

- （即  $X_d \neq X_q$  ），就会产生附加电磁功率

- 基本电磁功率

- 当 $\delta = 90^\circ$  时达到最高值

- 附加电磁功率

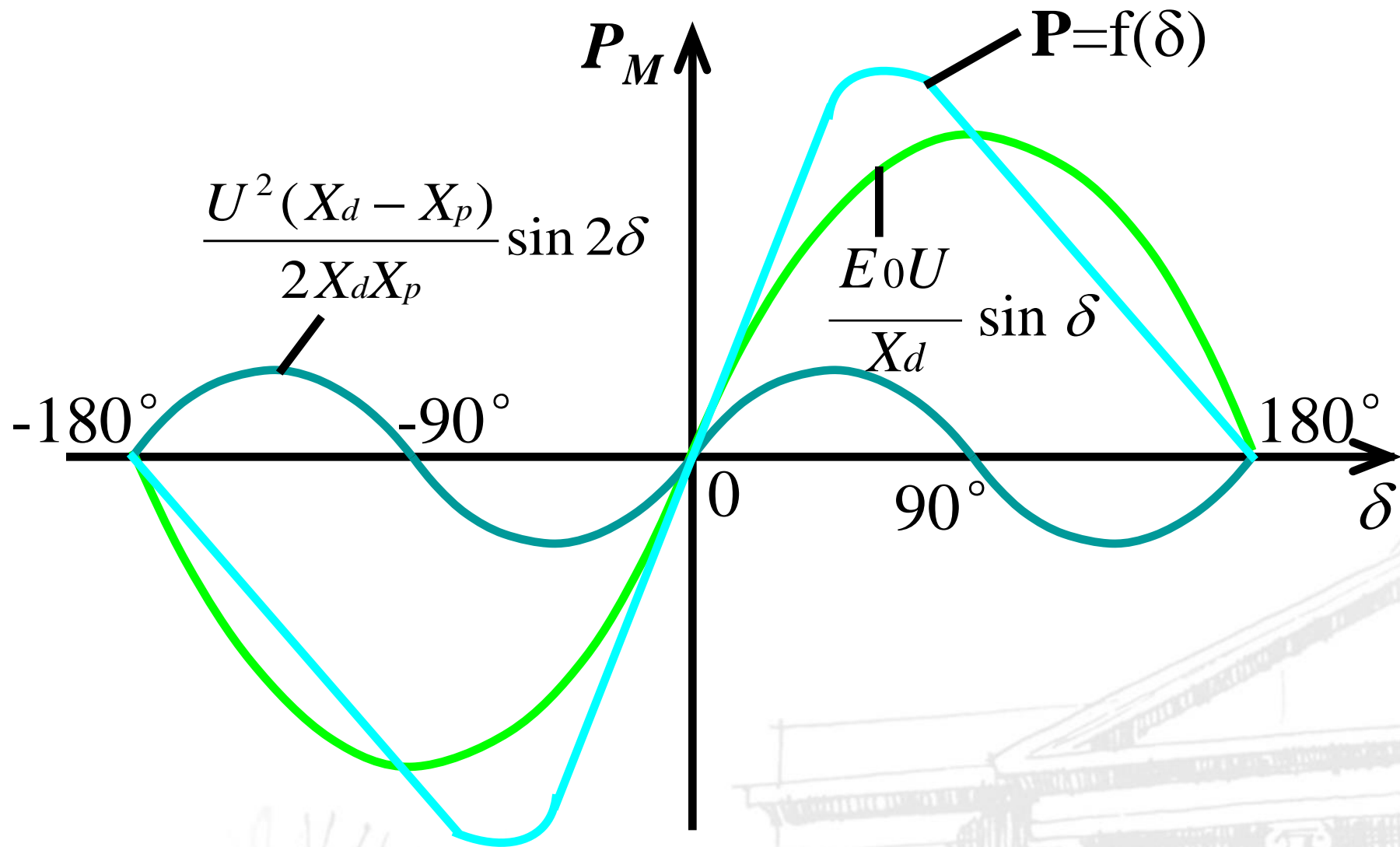
- 则当 $\delta = 45^\circ$  时有最高值

- 总的电磁功率

- 的最高值将出现在 $45^\circ \sim 90^\circ$  之间，具体视两项的振幅的相对大小而定



# 凸极同步发电机的功角特性



## 凸极式同步电机的功角特性



## - 凸极机电磁功率的特征

- 凸极机的最大电磁功率将比具有同样 $E_0$ 、 $U$ 及 $x_d$ 值的隐极机略大
- 当同步电机的 $E_0$ 愈大，附加电磁功率在整个电磁功率中所占的比例愈小；在正常情况下，附加电磁功率仅占百分之几。

## - 功角与位移角

漏阻抗压降一般较小，端电压 $U$ 和电枢合成电势 $E$ 相差甚微， $\delta$ 角就可近似认为是合成电势 $E$ 和空载电势 $E_0$ 间的时间相角差  
 $\delta$ 角约等于转子磁场和空气隙合成磁场之间的空间位移角

## - 功角

- $\delta$ 角为正值

- 转子磁场超前合成磁场，同步电机作为发电机运行。

- $\delta$ 角为负值

- 合成磁场在前，转子磁场在后，同步电机便作为电动机运行





## • 有功功率的调节

- 要调节有功功率，只需要调节发电机的输入机械功率
- 位移角 $\delta$ 会自行改变，相应地改变电磁功率和输出功率，达到新的平衡

## 稳定范围

- 同步发电机
  - $0 < \delta < \pi/2$ : 稳定
  - $\pi/2 < \delta < \pi$ : 不稳定
- 同步电动机
  - $-\pi/2 < \delta < 0$ : 稳定
  - $-\pi < \delta < -\pi/2$ : 不稳定



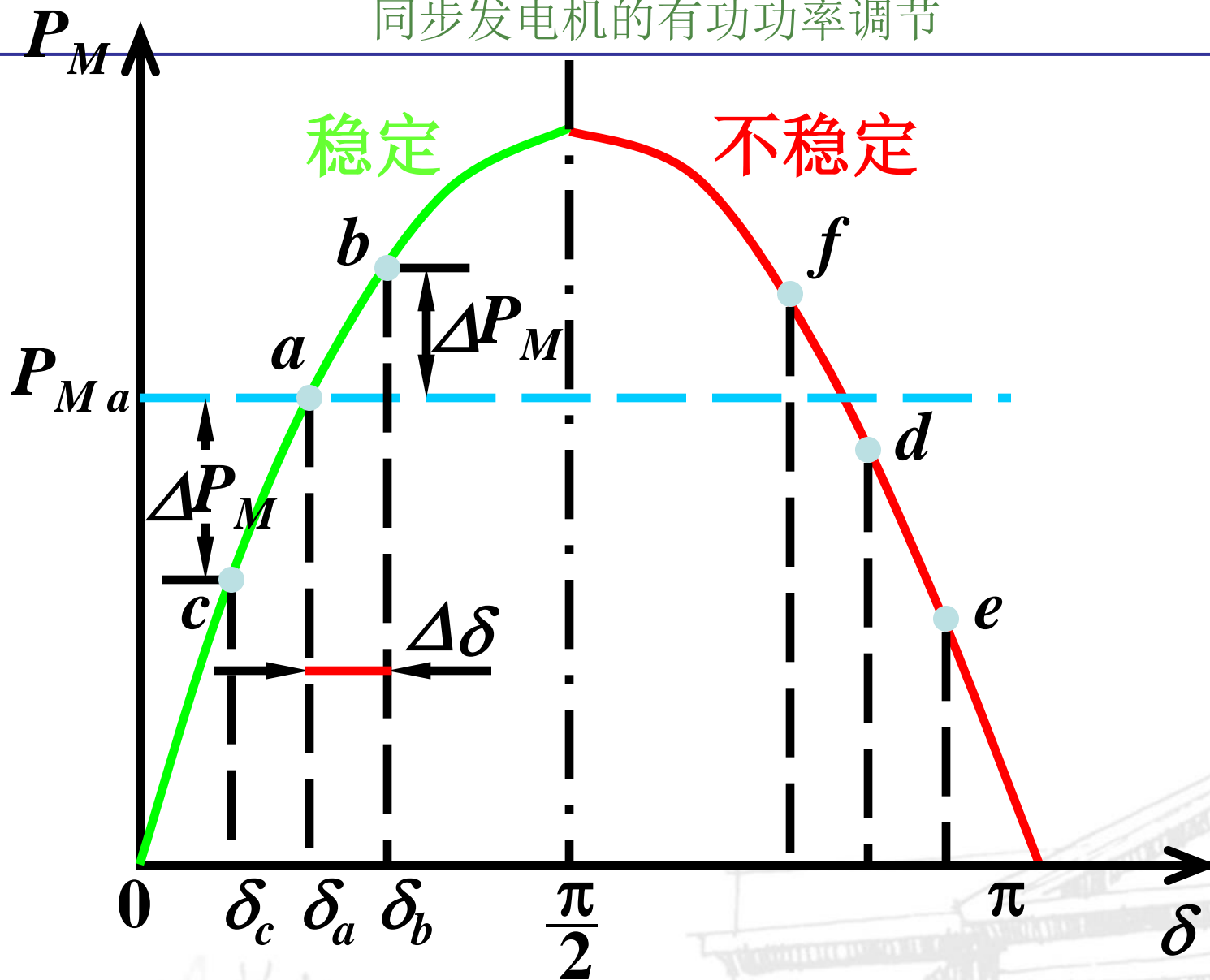
- 静态稳定的概念

- 发电机输入功率受到一些微小的扰动，在这种瞬时扰动消除后，

- 继续保持原来的平衡运行状态，就称这时的同步发电机是“静态稳定”的，

- 否则就是静态不稳定





## 静态稳定的概念

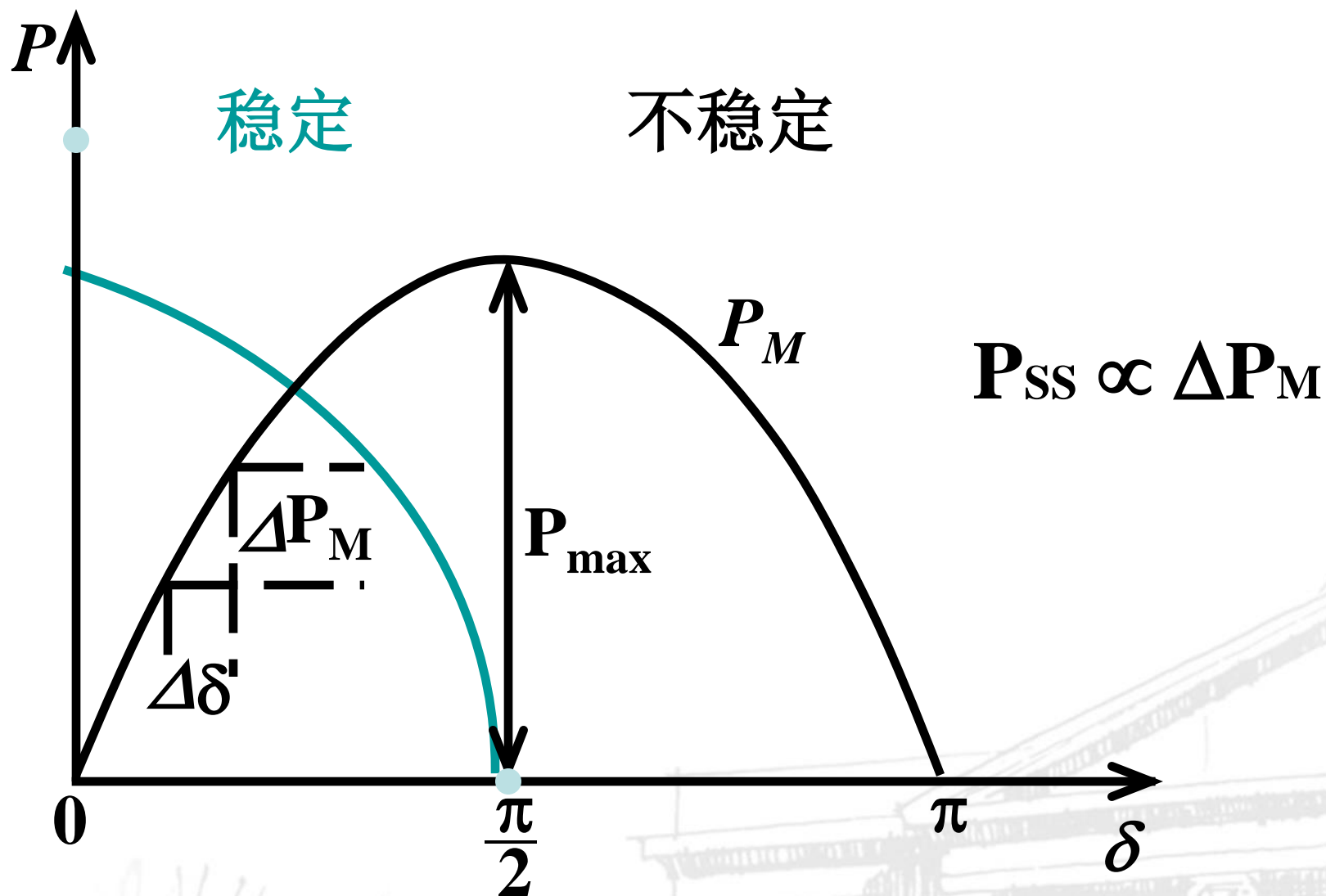
- 隐极式同步电机

$$P = P_M = \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$

$$P_{ss} = \frac{dP_M}{d\delta} = \frac{E_0 U}{x_s} \cos \delta$$

–  $P_{ss}$  可表示发电机运行的稳定度





比整步功率 $P_{SS}$  随角 $\delta$  而变化的关系

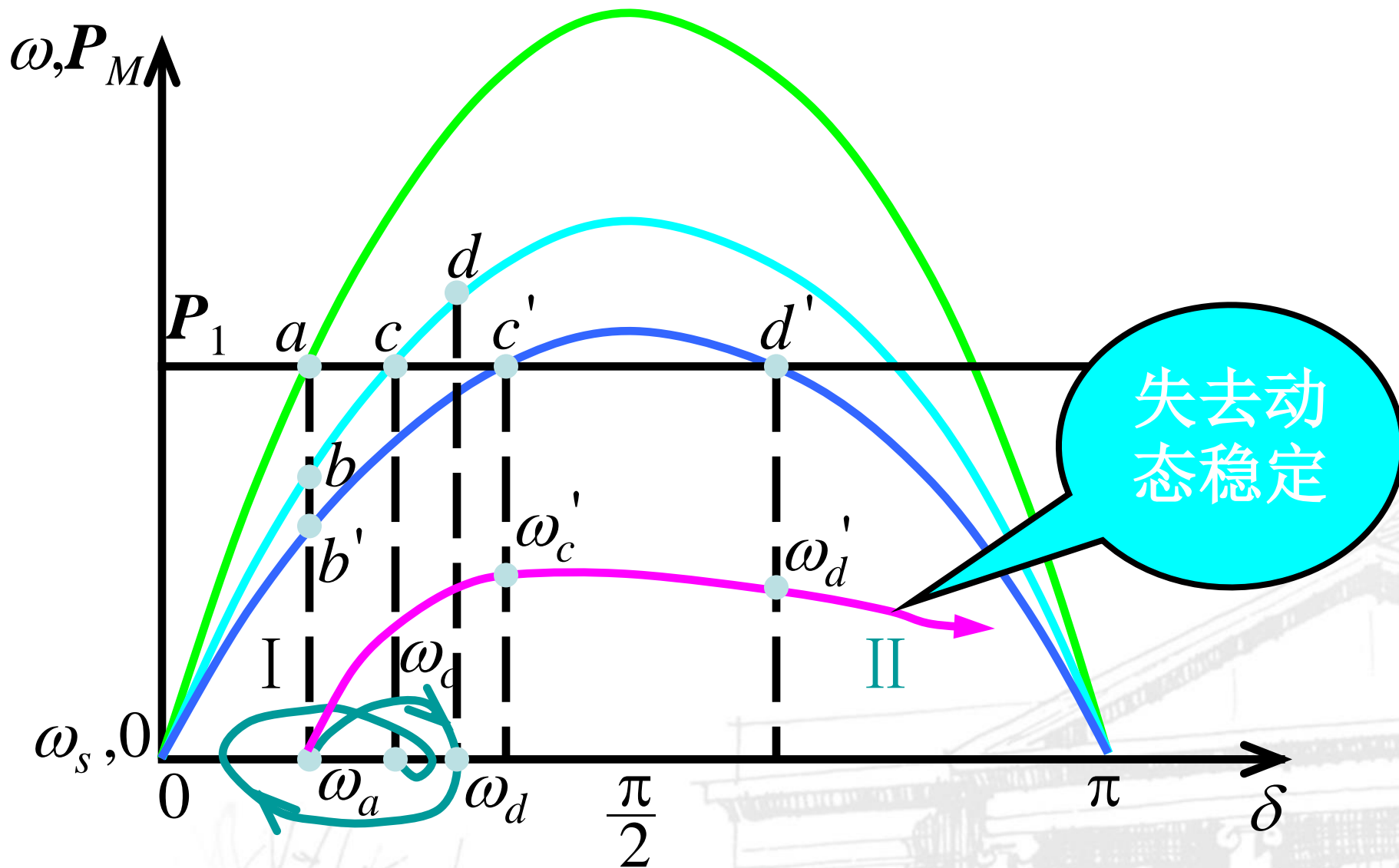
- 如果并联在电网上的同步电机失去静态稳定
  - 由于双方频率不同了，将引起一个很大的电枢电流
  - 由于输入和输出功率失去平衡，多余的功率可能引起转子超速，
  - 必须采取适当的措施，例如采用快速励磁装置来保证静态稳定。



- 动态稳定的概念

- 突然加负载、切除负载等正常操作时，或者发生突然短路、电压突变、发电机失去激磁电流等非正常运行时，能否继续保持同步运行的问题，称为动态稳定问题。





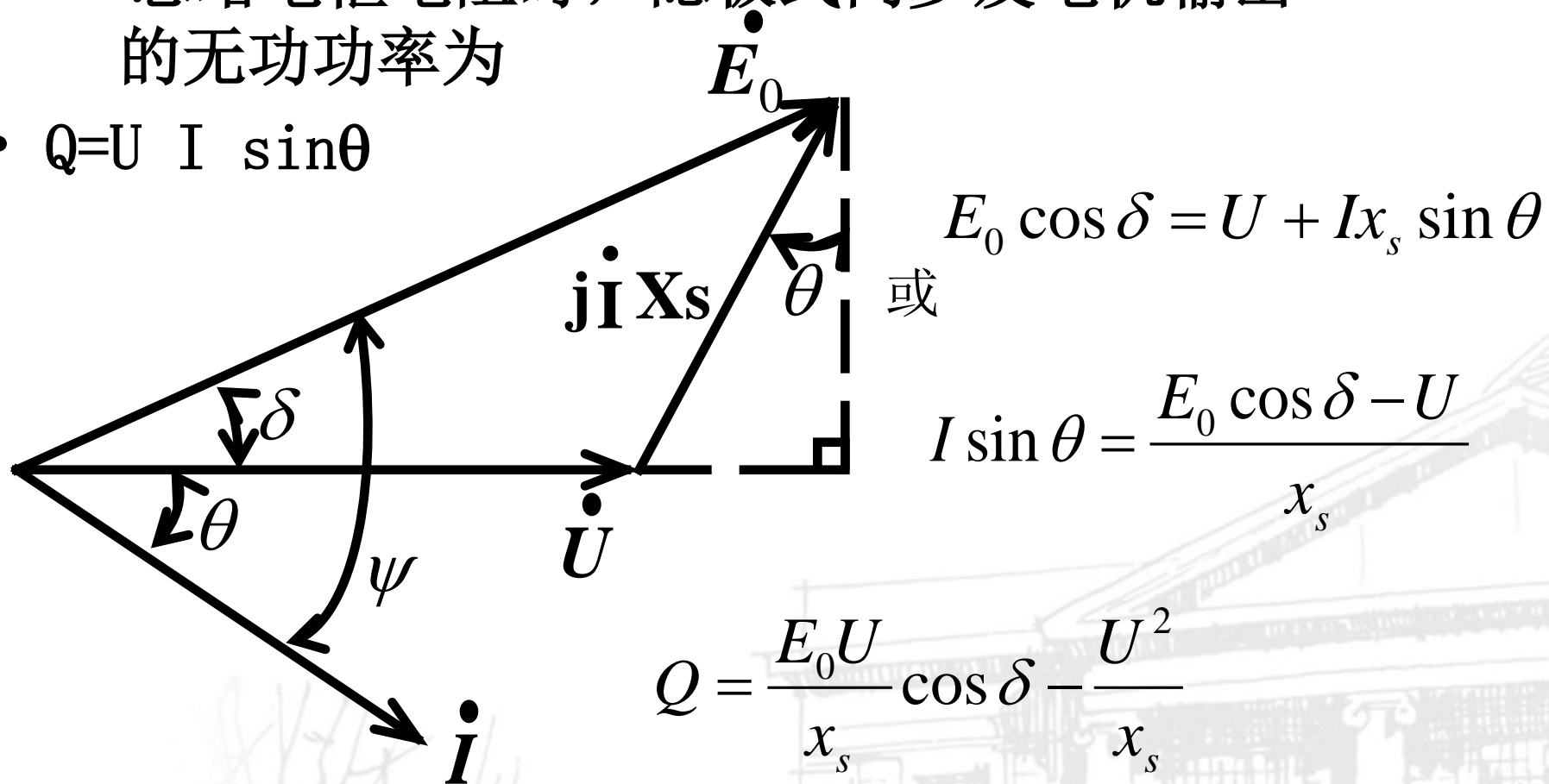


- 动态稳定是一个非常复杂的问题
  - 电网故障时，电网电压和发电机都处在过渡过程中，功角特性中的参量 $U$ 、 $E_0$ 、 $X_s$ 等均将是暂态变量，由稳定参量作出的功角特性就不再适用了
  - 以上分析均在假定发电机的激磁为常数的条件下进行的，实际上，现代同步发电机的原动机都带有快速调压器，增大激磁，使 $E_0$ 增大，功角特性曲线上升，从而提高动态稳定
  - 由保护装置将电网的故障迅速切除，则电网电压也能迅速恢复，亦能使功角特性上升，提高动态稳定。

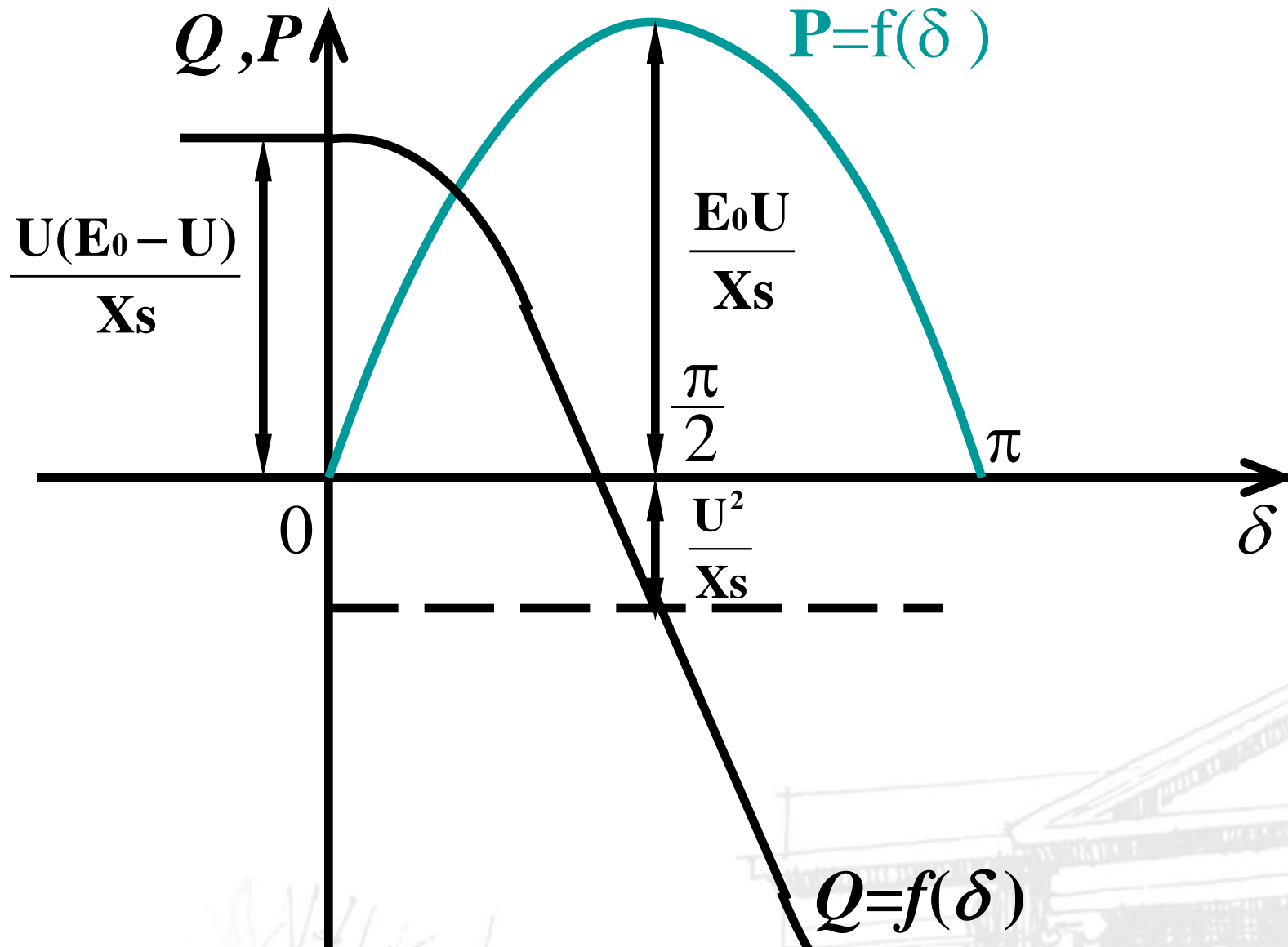


- 与电网并联的同步发电机
  - 与电网进行有功和无功的交换
  - 忽略电枢电阻时，隐极式同步发电机输出的无功功率为

- $Q = U I \sin \theta$



# 无功功率的调节和V形曲线



- 无功功率的调节

- 同步发电机与电网并联后，如仅仅调节无功功率，是不需要改变原动机的输入功率
- 只要调节同步发电机的激磁电流，就能改变同步发电机发出的无功功率（包括大小和性质）
- 同步发电机输出有功功率保持不变时

$$P = UI \cos \theta = \text{const}$$

$$\text{及 } P_M = \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta = \text{const}$$



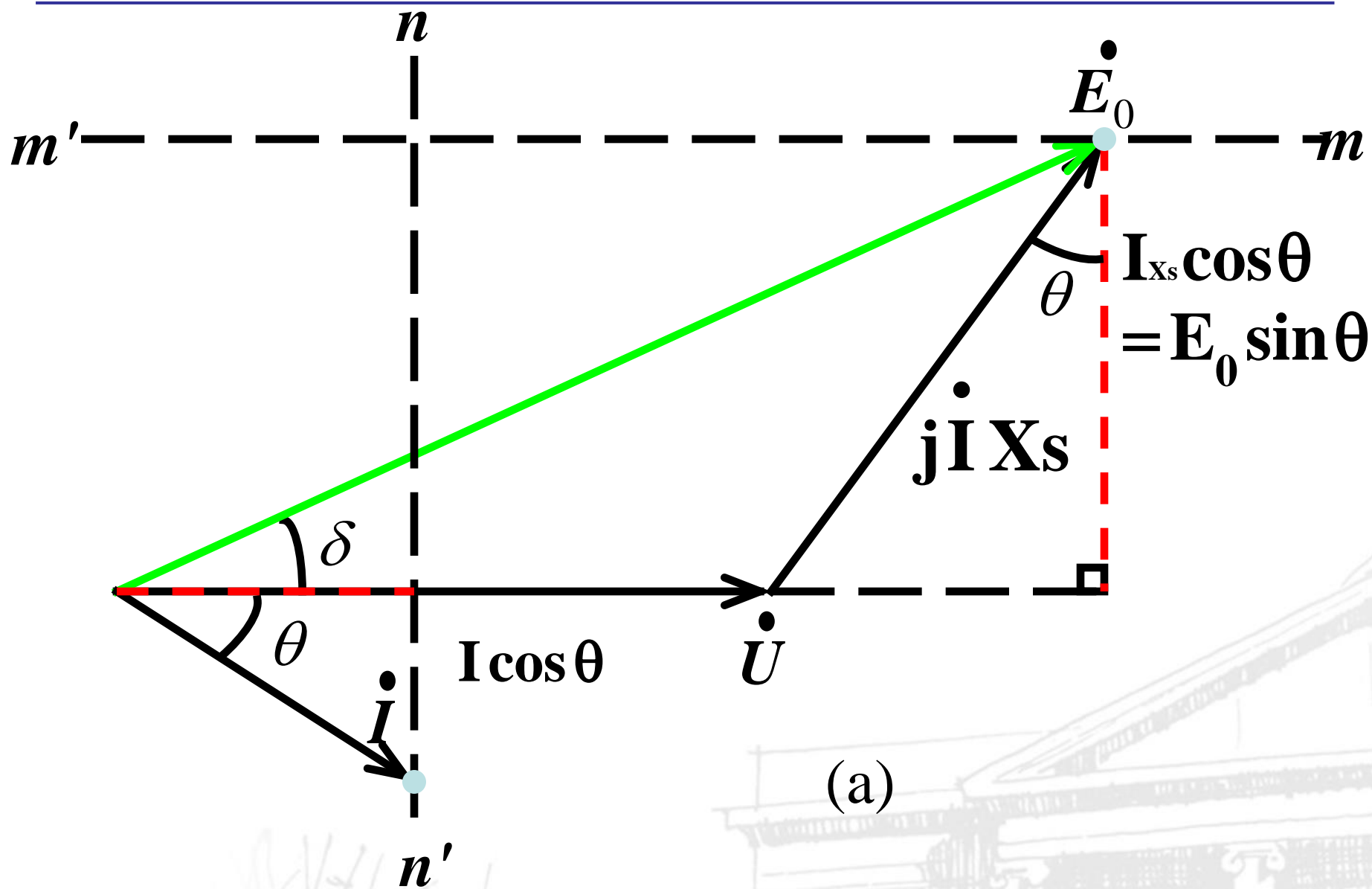
– 若电网电压再保持不变

$$\left. \begin{aligned} I \cos \theta &= \text{const} \\ E_0 \sin \delta &= \text{const} \end{aligned} \right\}$$

– 只调节无功时，上式应成立



## 无功功率的调节和V形曲线

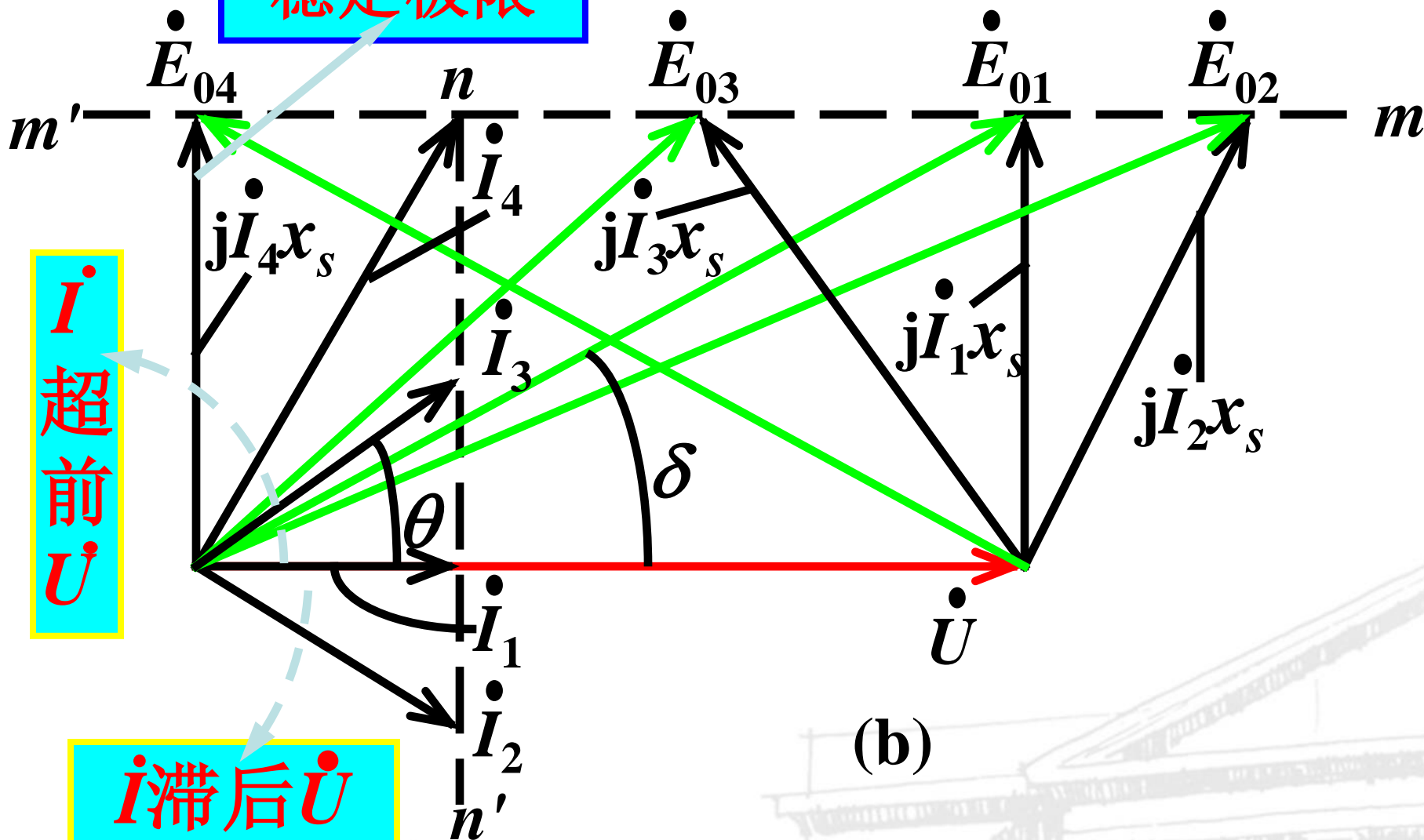


(a)

$P_M = \text{const}$ 时，调节激磁电流的相量图



稳定极限



$P_M = \text{const}$ 时，调节励磁电流的相量图

- 发电机与无穷大电网并联时，调节激磁电流的大小，就可以改变发电机输出的无功功率，不仅能改变无功功率的大小，而且能改变无功功率的性质。

当过激时，电枢电流是滞后电流，发电机输出感性无功功率。当欠激时，发电机输出容性无功功率，电枢电流是超前电流





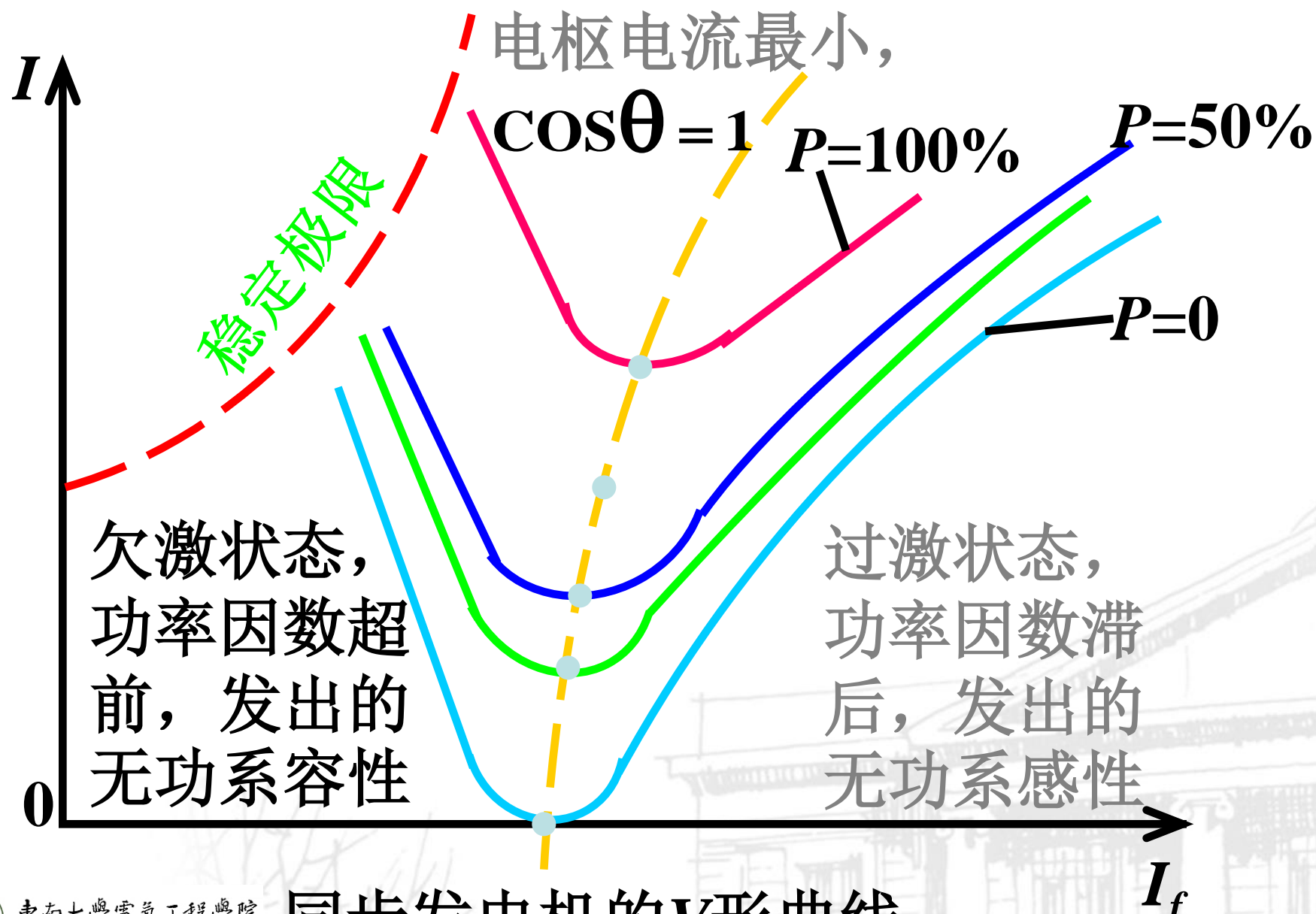
- **V 形曲线**

- 有功功率保持不变时，电枢电流和激磁电流之间关系曲线

$$\mathbf{I} = \mathbf{f}(\mathbf{I}_f)$$

- 形状象字母 “V”





- 对于与电网并联运行的发电机
  - 改变原动机的功率输入，发电机的位移角 $\delta$ 将变化，以调节有功功率
  - 若此时激磁保持不变，输出的无功功率也将发生变化
  - 如只要求改变有功功率，应在调节原动机方面的功率输入的同时，适当地改变同步发电机的激磁。
  - 如不调节原动机方面的功率输入，而仅调节同步发电机的激磁，则只能改变它的无功功率，并不会引起有功功率的改变
  - 空载电势 $E_0$ 和位移角 $\delta$ 会随着激磁的改变而发生了变化。



- 同步补偿机

- 同步电机可以专门用来供给无功功率，特别是感性无功功率。这种专供无功功率的同步电机称为同步补偿机或同步调相机

## 同步补偿机的作用

- 电网上大量的异步电动机需消耗相当数量的感性无功功率
- 若全部由发电机承担，其功率因数会很低，且电网负担也加重
- 因此，在适当的地点把负载所需的感性无功功率就近供给



- 同步补偿机可提高经济效益及改善运行条件
  - 减少发电机负担
  - 提高电网的功率因数
  - 降低线损

## 运行条件

- 一台在空载运行情况下的同步电动机
- 除了电机本身的损耗，它不从电网吸取其它的有功功率
- 当补偿机过激时，它将对电网供给感性无功功率（或自电网吸取电容性无功功率），功能犹如电容器



- 欠激时，它将从电网吸取感性无功功率，即起电抗器的作用
- 同步补偿机一般工作在过激状态来供给感性无功功率
- 同步补偿机的容量

### 过激时的视在功率

- 可以从数千千伏·安到数万千伏·安

同步补偿机既不用原动机拖动，也不输出机械功率，故在机械结构上要求较低

- 为提高利用率

极数较少，转速较高，空气隙较小

大容量的补偿机还采用氢冷或双水内冷，以节省材料

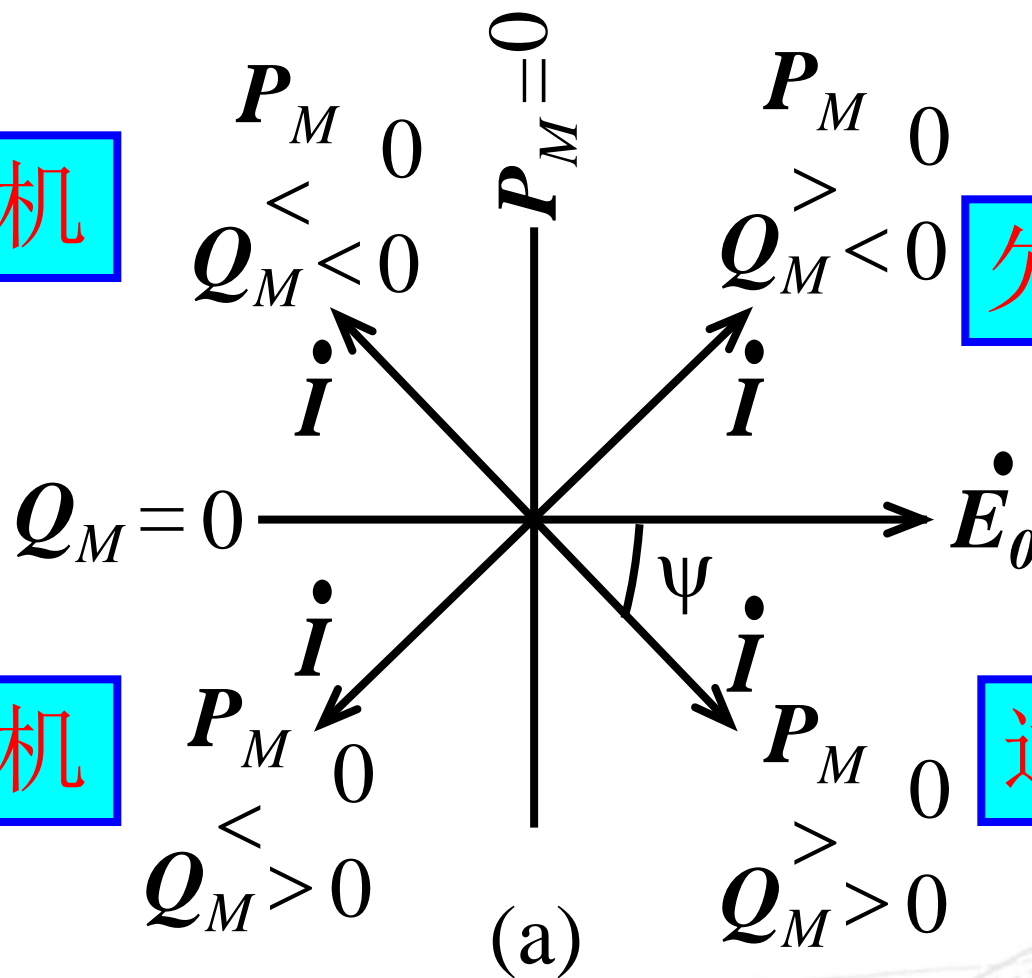


- 电网上的同步电机有四种运行情况
  - ①过激发电机
  - ②欠激发电机
  - ③过激电动机
  - ④欠激电动机



欠激电动机

欠激发电机



过激电动机

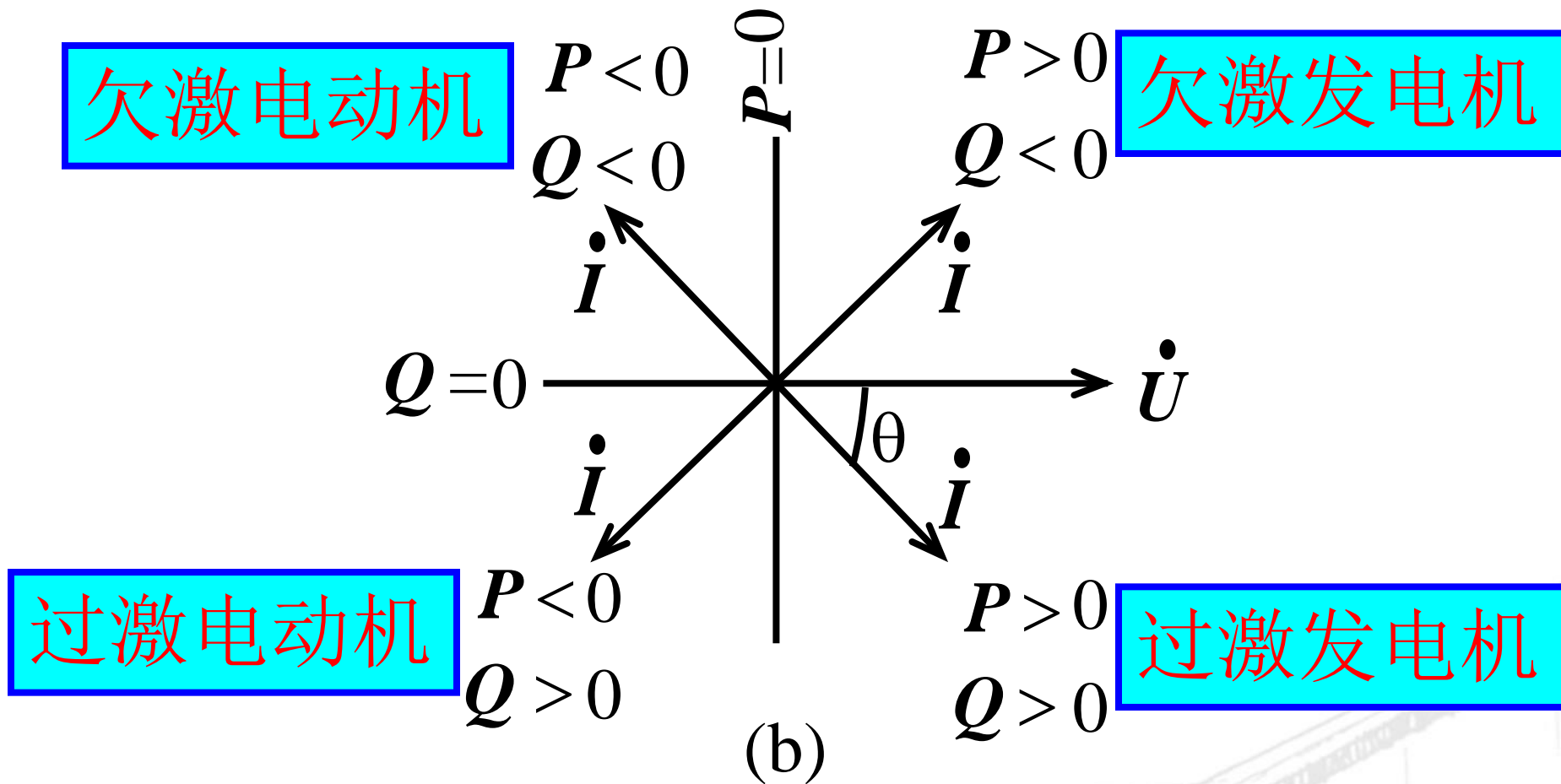
过激发电机

(a) 以电磁功率为准



- 当发出的电磁功率仅为有功功率
  - 内功率因数为1
  - 电枢反应仅有交轴分量
- 当发出的电磁功率仅为无功功率
  - 内功率因数为零
  - 电枢反应仅有直轴分量





(b) 以外功率为准

## 同步电机的各种运行情况



$$P_M - P = p_{Cu1} = I^2 r_a$$

- 对于隐极式电机
- 对于凸极式电机
- 对两种电机都有

$$Q_M - Q = I^2 x_s$$

$$Q_M - Q = I_d^2 x_d + I_q^2 x_q$$

$$Q = UI \sin \theta$$

$$Q_M = E_0 I \sin \psi$$

